

钢—混组合梁桥桥面板铺装顺序优化设计研究<sup>\*</sup>丁滨阳<sup>1</sup>, 田仲初<sup>1</sup>, 彭学军<sup>2</sup>, 汤宇<sup>2</sup>, 凌涛<sup>2</sup>, 丛培<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中铁五局集团 第一工程有限公司, 湖南 长沙 410117)

**摘要:** 针对钢—混组合梁桥桥面板铺装中负弯矩区应力较大导致混凝土开裂的问题, 以宁夏镇罗黄河特大桥主桥为依托工程, 采用单向连续铺装法、双向对称铺装法、墩顶对称铺装法、皮尔格铺装法 4 种桥面板施工方法对钢—混组合连续梁桥桥面板铺装顺序进行研究, 利用有限元分析软件建立全桥模型, 模拟施工过程中桥面板铺装顺序, 得到墩顶桥面板应力, 并计算分析负弯矩区桥面板的最大裂缝宽度。结果表明, 4 种方法在成桥下钢箱梁的应力相差不大, 采用皮尔格法铺装桥面板时, 负弯矩区最大拉应力仅为 0.2 MPa, 最大裂缝宽度仅为 0.07 mm, 采用该方法能减小墩顶拉应力, 有效控制裂缝宽度, 确保成桥后结构整体安全、稳定。

**关键词:** 桥梁; 钢—混组合梁桥; 桥面板; 铺装顺序; 墩顶负弯矩区; 混凝土裂缝

**中图分类号:** U445.33

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2022)06-0109-04

钢—混凝土组合梁桥施工中, 主梁结构应力和变形受施工方法的影响很大, 特别是墩顶桥面板负弯矩区的应力状态和混凝土裂缝宽度。已有研究成果大多只是针对现浇桥面板进行施工工艺研究和结构受力分析, 对预制桥面板的施工工艺对结构的影响鲜有研究。本文以宁夏镇罗黄河特大桥主桥为依托工程, 采用单向连续铺装法、双向对称铺装法、墩顶对称铺装法、皮尔格铺装法 4 种施工方法, 对比分析不同桥面板铺装顺序下负弯矩区桥面板应力、钢箱梁应力及裂缝宽度, 研究钢—混组合梁桥负弯矩区桥面板受力状况的优化方法, 为钢—混组合梁桥桥面板施工提供借鉴。

## 1 工程概况

宁夏镇罗黄河特大桥主桥跨径布置为 55 m + 6 × 90 m + 55 m, 桩号为 LK5+999—LK6+649, 为单箱单室组合梁连续梁桥, 分幅布置, 中心梁高 4.5 m, 顶板全宽 12.75 m, 底板宽 6.7 m (见图 1)。钢箱梁采用顶推施工方法。

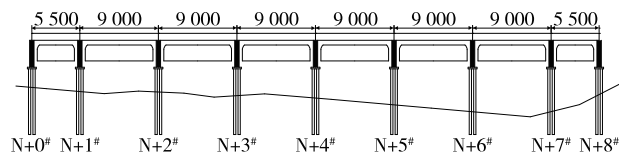


图 1 镇罗黄河特大桥主桥桥型布置示意图(单位: cm)

## 2 桥面板施工方法

钢—混组合梁桥的桥面板通常在主梁施工完成后架设, 不同桥面板铺装顺序对钢箱梁和桥面板结构的受力有影响。为避免桥面板铺装过程中负弯矩区应力较大导致混凝土开裂, 针对镇罗黄河特大桥预制桥面板的特点, 结合施工实际情况, 采用单向连续铺装法、双向对称铺装法、墩顶对称铺装法、皮尔格铺装法 4 种施工方法进行对比分析。

### 2.1 单向连续铺装法

单向连续铺装法将预制桥面板从主桥一端向另一端连续不断地铺设。待钢箱梁顶推就位后, 安装架桥机, 依次吊装首跨桥面板就位, 同批次按顺序浇筑首跨桥面板内现浇混凝土(含湿接缝), 张拉本阶段预应力; 继续上述步骤, 完成所有桥面板铺装(见图 2)。然后铺设二期恒载, 全桥整体完工。这种施

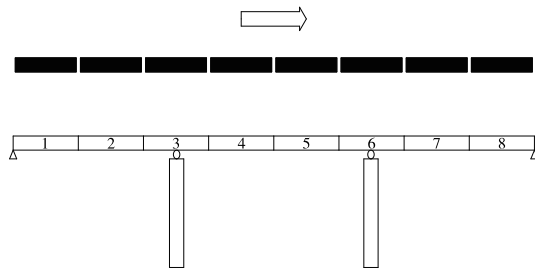


图 2 单向连续铺装法原理示意图

<sup>\*</sup> 基金项目: 宁夏科技厅重大项目(2021BEG02021)

工方法在跨度较小的组合梁桥中应用较多,其优点是方便连续施工作业,但墩顶桥面板在后续预制桥面板自重作用下会产生较大拉应力。

## 2.2 双向对称铺装法

双向对称铺装法是指预制桥面板分别从主桥南岸和北岸两侧向中间同步铺装。同步吊装首跨和末跨桥面板,同时浇筑首跨和末跨内现浇混凝土、张拉本阶段预应力。重复上述步骤直至桥面板铺装完成(见图3)。

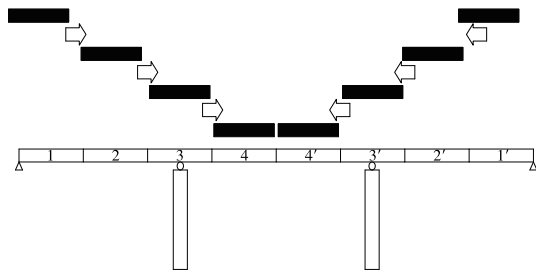


图3 双向对称铺装法原理示意图

## 2.3 墩顶对称铺装法

墩顶对称铺装法是首先在各墩墩顶将预制桥面板铺装到位,然后同步向跨中铺装桥面板。该方法要求制作多个作业平台,在各墩墩顶处均布置架桥吊机和运板小车,然后同步铺装直至桥面板施工完成(见图4)。

## 2.4 皮尔格铺装法

皮尔格铺装法又称间断铺装法,先铺设所有跨径内的桥面板,然后铺设墩顶桥面板。从南岸向北岸依次吊装所有跨径内节段桥面板,然后按顺序浇筑所有跨径内现浇混凝土,同时张拉本阶段预应力。

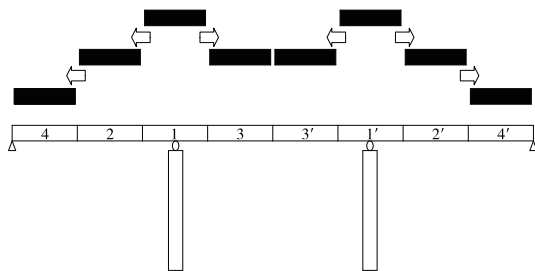


图4 墩顶对称铺装法原理示意图

最后从北岸向南岸依次吊装墩顶桥面板,并同步浇筑墩顶处现浇混凝土(见图5)。采用这种方法能避免墩顶桥面板在铺装过程中因受到跨径内桥面板自重作用而产生较大拉应力,减小混凝土裂缝宽度。

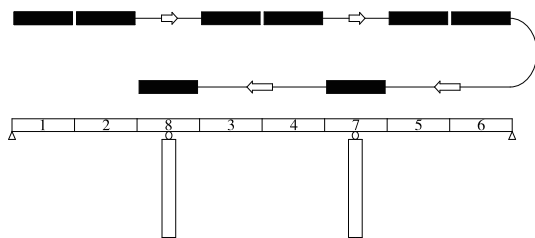


图5 皮尔格铺装法原理示意图

## 3 有限元模型建立

### 3.1 整体模型建立

利用有限元软件模拟主梁施工过程,针对镇罗黄河特大桥主桥顶推施工特点,将钢箱梁单元细分为1 m/单元,主梁共计727个梁单元、1317个节点。由于桥面板采用预制铺装方法,建模分析时以顶推落梁后的模型为基础。

### 3.2 计算参数(见表1)

表1 主桥构件材料计算参数

构件	材料	弹性模量/MPa	泊松比	热膨胀系数	自重/(kN·m <sup>-3</sup> )
钢箱梁	Q345 钢材	$2.06 \times 10^5$	0.3	$1.2 \times 10^{-5}$	78.5
预制桥面板	C55 混凝土	$3.55 \times 10^4$	0.2	$1.0 \times 10^{-5}$	25.0

### 3.3 荷载施加

钢箱梁的横隔板有多种形式,其质量各不相同,分布位置也不同。建立有限元模型时通过添加节点荷载的形式将不同种类横隔板分布在主梁的不同位置,桥面剪力钉则通过均布荷载的形式分布在整个主梁上。

### 3.4 主梁与桥面板的连接

依托顶推落梁后的有限元模型,利用施工联合截面来模拟桥面板与钢箱梁的耦合作用(见图6)。

当现浇混凝土和剪力槽还没浇筑时,通过施加均布荷载模拟桥面板和湿接缝作用在钢箱梁上的力。为确保有限元模拟准确,设置多个分析步长来模拟预制桥面板的分段铺装,研究4种施工方法对结构受力的影响。



图6 皮尔格铺装法有限元模型示意图

4 不同桥面板施工方法下钢—混组合梁应力分析

4.1 各墩墩顶桥面板应力分析

不同桥面板施工方法下墩顶桥面板的最大应力见表 2。

表 2 不同桥面板施工方法下各墩墩顶桥面板最大应力

桥面板 施工方法	各墩墩顶桥面板最大应力							MPa
	N+1 <sup>#</sup>	N+2 <sup>#</sup>	N+3 <sup>#</sup>	N+4 <sup>#</sup>	N+5 <sup>#</sup>	N+6 <sup>#</sup>	N+7 <sup>#</sup>	
单向连续铺装法	1.9	1.6	1.5	1.7	1.8	1.9	2.0	
双向连续铺装法	0.4	0.5	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	
墩顶对称铺装法	0.2	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	0.9	
皮尔格铺装法	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.2	-0.1	

工时,各墩墩顶处桥面板产生部分拉应力,但远小于桥面板混凝土抗拉强度设计值,不影响结构的受力状态。采用单向连续铺装法和墩顶对称铺装法施工时,N+2<sup>#</sup>~N+6<sup>#</sup>墩墩顶处混凝土桥面板出现较大拉应力,最大拉应力达 2.0 MPa,对结构受力状态有所影响。

4.2 成桥阶段钢箱梁应力分析

不同桥面板施工方法下成桥阶段钢箱梁应力分布见图 7~10 和表 3。



图 7 采用单向连续铺装法施工时成桥阶段钢箱梁应力云图(单位:MPa)



图 8 采用双向对称铺装法施工时成桥阶段钢箱梁应力云图(单位:MPa)



图 9 采用墩顶对称铺装法施工时成桥阶段钢箱梁应力云图(单位:MPa)

由表 2 可知:采用皮尔格铺装法施工时,N+1<sup>#</sup>~N+4<sup>#</sup>和 N+7<sup>#</sup>墩墩顶处桥面板应力为-0.1 MPa,桥面板处于受压状态,结构受力状况良好;N+5<sup>#</sup>和 N+6<sup>#</sup>墩墩顶处桥面板出现很小的拉应力,说明采用皮尔格法进行桥面板铺装能在一定程度上减小墩顶处拉应力。采用双向连续铺装法施

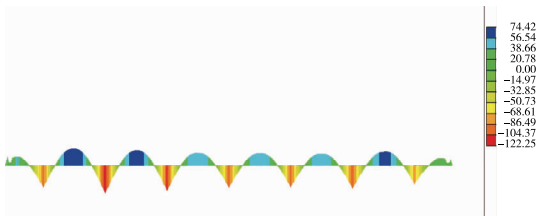


图 10 采用皮尔格铺装法施工时成桥阶段钢箱梁应力云图(单位:MPa)

表 3 不同桥面板施工方法下成桥阶段钢箱梁最大应力

桥面板施工方法	钢箱梁最大应力	MPa
单向连续铺装法	120.22	
双向对称铺装法	122.26	
墩顶对称铺装法	122.08	
皮尔格铺装法	122.25	

由图 7~10 和表 3 可知:4 种桥面板施工方法对成桥阶段钢箱梁应力的影响不大,且应力均在规范容许范围内。

5 桥面板裂缝宽度计算

5.1 裂缝宽度计算理论

一般情况下混凝土构件的抗拉性能较差,在正常使用状态下会导致混凝土裂缝,为保证混凝土结构的正常使用,结构设计时需将裂缝宽度控制在规范允许范围内。国内外许多学者对裂缝产生原理进行了研究,但由于混凝土材料本身及裂缝产生的随机性和不确定性,研究分析裂缝的难度增大。目前形成了多种裂缝计算理论,主要包括黏结—滑移理论、无滑移理论及黏结—滑移理论和无滑移理论相

结合的综合分析理论。本文不考虑黏结、滑移的影响,选择无滑移理论计算裂缝宽度。两条裂缝之间混凝土应力与应变分布按弹性力学的方法计算得到。裂缝的最大宽度与混凝土保护层厚度  $c$ 、裂缝间平均应变成正比,即:

$$W_{fk} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left( \frac{c+d}{0.30+1.4\rho_{te}} \right)$$

式中: $C_1$  为钢筋表面形状系数,该桥采用带肋钢筋, $C_1=1.00$ ;  $C_2$  为作用长期效应影响系数, $C_2=1+0.5(M_1/M_s)$ ;  $M_1$ 、 $M_s$  分别为作用准永久组合和作用频遇组合计算的弯矩设计值;  $C_3$  为与构件受力性质有关的系数,本文分析轴心受拉构件, $C_3=1.2$ ;  $\sigma_{ss}$  为钢筋应力;  $c$  为最外排纵向受拉钢筋的混凝土保护层厚度;  $d$  为纵向受拉钢筋的直径;  $\rho_{te}$  为纵向受拉钢筋的有效配筋率。

## 5.2 最大裂缝宽度计算

根据作用准永久组合和频遇组合算出的墩顶最大负弯矩值,得出墩顶负弯矩区最大裂缝宽度(见表4)。由表4可知:采用单向连续铺装法施工时墩顶混凝土桥面板裂缝宽度最大,达0.21 mm;采用皮尔格铺装法施工时,混凝土桥面板的裂缝宽度最小,为0.07 mm;采用双向对称铺装法和墩顶对称铺装法施工时,裂缝宽度分别为0.11 mm、0.16 mm。采用单向连续铺装法施工时桥面板最大裂缝宽度大于规范容许值0.20 mm,其他3种方法均满足规范要求。

表4 不同桥面板施工方法下负弯矩区最大裂缝宽度

桥面板 施工方法	墩顶最大负弯矩/(kN·m)		最大裂缝宽度 $W_{fk}$ /mm
	作用准永久组合	作用频遇组合	
单向连续 铺装法	-309 718.7	-318 201.5	0.21
双向连续 铺装法	-260 320.6	-279 352.6	0.11
墩顶对称 铺装法	-311 383.1	-316 865.9	0.16
皮尔格 铺装法	-204 614.1	-229 879.8	0.07

## 6 结论

本文以镇罗黄河特大桥为例,采用有限元软件模拟实际施工过程中桥面板铺装顺序,得出墩顶桥面板最大拉应力,并计算负弯矩区桥面板的最大裂缝宽度,对不同桥面板施工方法进行对比,得出如下

结论:

(1) 采用皮尔格铺装法施工混凝土桥面板时,仅部分桥墩墩顶桥面板出现很小的拉应力,采用该方法能在一定程度上减小墩顶处拉应力。采用单向连续铺装法和墩顶对称铺装法,墩顶桥面板出现较大拉应力,最大拉应力达2.0 MPa,超过规范限值,对结构长期整体受力影响很大。

(2) 4种桥面板铺装法对成桥阶段钢箱梁应力的影响不大,且应力均小于规范限值235 MPa。

(3) 改变桥面板铺装顺序对裂缝宽度影响很大,采用单向连续铺装法时墩顶混凝土桥面板裂缝宽度达0.21 mm大于规范容许值0.20 mm。采用皮尔格铺装法能减小混凝土桥面板的裂缝宽度。

## 参考文献:

- [1] 聂建国,陶慕轩,吴丽丽,等.钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J].土木工程学报,2012,45(6):110-122.
- [2] 李聪.钢-混组合连续梁负弯矩区受力性能研究及实用新型装置[J].公路工程,2021,46(1):18-22+80.
- [3] 宋爱明,李志聪,徐洪涛,等.钢-混凝土组合梁负弯矩区裂缝宽度数值计算模型[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(3):75-81.
- [4] 周旋,贺耀北,刘榕,等.钢-UHPC组合梁斜拉桥桥面板裂缝宽度计算方法研究[J].公路工程,2021,46(4):110-117.
- [5] 陈正星,刘甜甜.钢-混凝土组合梁负弯矩区设计方法的国内外规范对比分析[J].公路,2020,65(8):203-206.
- [6] 亓路宽,李琳,常晶,等.钢-混凝土连续组合梁负弯矩区裂缝宽度[J].北京工业大学学报,2008,34(7):714-719.
- [7] 王红良,钱金巨,王立超,等.连续组合梁桥桥面板施工顺序影响研究[J].公路与汽运,2021(1):121-125.
- [8] 曹小博,陈刚.新型钢混组合梁桥面板结构的分析研究[J].公路,2021,66(1):208-211.
- [9] 张万里.钢混组合连续刚构桥混凝土桥面板安装[J].公路,2019,64(10):152-156.
- [10] 罗检萍,黄红明.高韧超薄沥青磨耗层在旧砼桥面铺装中的应用[J].公路与汽运,2022(2):126-129.
- [11] 伍峻.深圳南坪快速钢桥浇筑式沥青路面铺装技术研究[J].公路与汽运,2021(4):150-153.
- [12] 谢飞,谢智荣,肖百豪.正交异性钢桥面铺装病害分析及维修对策研究[J].公路与汽运,2020(5):125-128.

收稿日期:2021-08-18